

黄麻吸附重金属 Cr(VI) 专用种质筛选

李楠, 龚友才, 陈基权, 温岚, 戴志刚, 粟建光

(中国农业科学院麻类研究所, 长沙 410205)

摘要:首次以国内外 23 个代表性黄麻种质为研究对象, 用主茎嫩梢和一、二级分枝嫩梢制成天然重金属吸附剂, 测定其对溶液中 Cr(VI) 离子的去除率, 并对与黄麻吸附能力及产量密切相关的功能性状: 生育期动态、株高、分枝习性、各级分枝嫩梢的产量进行调查、方差分析和相关性分析。结果表明, 不同黄麻种质制成的生物吸附剂对 Cr(VI) 的吸附能力不同, 去除率在 85.25% ~ 96.88% 之间; 不同级次分枝嫩梢的产量及对 Cr(VI) 的去除率不同; 种质间除出苗速度外所有调查性状均存在较大差异; 去除率与株高呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。从产量和去除率方面综合考虑, J001 和 J011 2 个种质表现优良, 适宜作为吸附重金属专用品种推广种植。

关键词:黄麻种质; 嫩梢; 产量; Cr(VI); 吸附

Screening of Jute Germplasm for Adsorption of Heavy Metal Cr(VI)

LI Nan, GONG You-cai, CHEN Ji-quan, WEN Lan, DAI Zhi-gang, SU Jian-guang

(Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410205)

Abstract: In this paper, the tender shoots of main stem, primary and secondary branch of 23 typical jute germplasm collected from home and abroad were first made into natural heavy metal adsorbent to determine the removal rate of Cr(VI) in solution. Investigation, variance analysis and correlation analysis of functional traits closely related to adsorption capacity and production of tender shoot were conducted, including growth duration dynamic, plant height, branching habit, and tender shoots yield at all levels branches. The results showed that the removal rate of Cr(VI) varied with variety of jute from 85.25% - 96.88%. Different branching levels of tender shoot lead to different yields and removal rates. All characters investigated were quite different except emergence speed of 23 jute germplasm. In addition, there was significantly negative correlation between plant height and removal rate ($P < 0.01$). With excellent production and removal rate on Cr(VI), the J001 and J011 were suitable for cultivating as special germplasm for heavy metal adsorption.

Key words: jute germplasm; tender shoot; yield; Cr(VI); adsorption

黄麻的栽培种有长果 (*Corchorus olitorius* L.) 和圆果 (*Corchorus capsularis* L.) 两大类。

黄麻为椴树科 (Tiliaceae) 黄麻属 (*Corchorus*) 一年生草本植物, 在我国栽培历史悠久, 早在北宋《图经本草》(公元 1061 年) 中就有关于黄麻形态特征的简要描述^[1]。长期以来黄麻主要被用作天然纤维原料, 在粗纺包装行业发挥着举足轻重的作

用^[2], 而作为黄麻副产物的嫩梢和叶片鲜被人利用。前期研究表明, 长果黄麻对 Cr(VI)、Cd、Pb、Ni、Cu 等重金属具有很强的吸附性能; 虽然黄麻全株均可用于吸附重金属, 但黄麻叶和嫩梢相对于茎秆来说具有更强的吸附能力, 黄麻嫩梢和叶片的产量及其占全株比重直接影响吸附剂吸附性能。黄麻嫩梢和叶片经过一定处理完全可以替代化学絮凝剂聚丙

收稿日期: 2014-01-10 修回日期: 2014-03-03 网络出版日期: 2014-06-09

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20140609.1426.020.html>

基金项目: 国家麻类产业技术体系种质资源评价 (CARS-19-E01)

第一作者研究方向为黄麻种质资源、遗传育种与多用途利用研究。E-mail: 13187093552@163.com

通信作者: 龚友才, 研究方向为黄麻种质资源、遗传育种与多用途利用研究。E-mail: hngyc1963@163.com

烯酰胺,且具有价格低廉、高效、可再生、不产生二次污染等突出特点,可在水体重金属污染修复中发挥重要作用。

在生物吸附领域,研究较多的是吸附过程、机理^[3-5]以及根据吸附性能优劣对不同生物种类进行筛选^[6-9],而对某一优质吸附材料不同种质的性状分析与种质筛选未见报道。为发掘嫩梢产量较高且对重金属有高效吸附能力的黄麻种质,本试验以国内外不同黄麻种质为研究对象,对与嫩梢产量密切相关的株高、分枝数、生育期等性状进行了调查,并以重金属离子 Cr(VI)为吸附对象进行了不同种质、不同级次分枝嫩梢的吸附性能研究,以期明确株高、分枝数、各级分枝嫩梢产量和去除率之间的关系,并筛选出适合重金属吸附的黄麻种质,为开发黄麻吸附重金属专用高产新种质提供依据。

1 材料与方法

1.1 参试材料

参试黄麻种质材料 23 份,分别来自 7 个国家 13 个地区,包括 3 大类型(表 1)。

表 1 参试种质代码、来源与分类

Table 1 Numbers, origins and classification of testing germplasms

种质代码 Number	来源地 Origin	类型 Type	种质代码 Number	来源地 Origin	类型 Type
J001	孟加拉	栽培种	J013	中国湖南	栽培种
J002	肯尼亚	半野生	J014	马里	野生种
J003	肯尼亚	野生种	J015	中国湖南	栽培种
J004	孟加拉	栽培种	J016	中国河南	栽培种
J005	俄罗斯	栽培种	J017	中国广东	栽培种
J006	中国湖南	栽培种	J018	中国湖南	栽培种
J007	中国湖南	栽培种	J019	中国广西	栽培种
J008	肯尼亚	野生种	J020	中国广东	栽培种
J009	巴基斯坦	栽培种	J021	中国云南	野生种
J010	印度	栽培种	J022	中国湖南	栽培种
J011	中国湖南	栽培种	J023	中国浙江	栽培种
J012	中国江西	栽培种			

由于涉及到知识产权保护,所有种质未列出名称,仅以代号表示

Due to the protection of intellectual property rights, the germplasm was expressed in code instead of name

1.2 田间试验设计与方法

田间试验于 2013 年 5-9 月在中国农业科学院麻类研究所望城试验基地进行。试验田内土质黄壤,肥力中等,常年种植黄麻,冬季闲置。试验采用随机区组设计,3 次重复,小区面积 3.5 m²,每小区种植 5 行,行距 35 cm,株距 10 cm,苗高 15 cm 时定

苗。整地、施肥,田间管理等按一般大田生产进行。

7 月 9 日每小区随机取 10 株定株并测量株高;7 月 10 日收获小区内全部主茎嫩梢(嫩梢长度 15 cm);7 月 23 日调查一级分枝数并收获小区内全部一级分枝的嫩梢,长度大于 15 cm 计为有效分枝(下同);8 月 13 日调查二级分枝数并收获小区内全部二级分枝嫩梢。

分批收获的嫩梢自然晒干(含水率约为 13%),称重,记录产量,贮存备用。

1.3 去除率的测定方法

收获的黄麻嫩梢经粉碎机粉碎、过筛,得到 80 目的吸附剂样品,于 40 ℃烘箱中烘干至恒重,置于密封袋中贮存备用。将 110 ℃下干燥 2 h 的重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)0.2829 g 用 dd H₂O 溶解,配制成 100 mg/L 的 Cr(VI)溶液备用。

每个样品按如下步骤处理:取 100 mL Cr(VI)溶液置于 200 mL 的烧杯中,用 60%~68% HNO₃ 调节到溶液 pH = 1,加入 0.5 g 嫩梢粉末,置于搅拌机,以 150 r/min 的速度搅拌 1 h,取出 1.4 mL 混合液,15000 r/min 离心 2 min,取上清液,按照二苯碳酰二肼分光光度法^[10]测定剩余 Cr(VI)的吸光度并按下式计算去除率。

$$R = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100\%$$

其中, R 为去除率(%), C_0 和 C_t 分别为 Cr(VI) 的初始浓度(mg/L)和吸附 t 时刻浓度(mg/L)。

1.4 数据处理

用 Excel 整理数据,所有数据以平均值 ± 标准差表示,采用软件 SPSS Statistics 19 进行方差分析和相关性分析,用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 生育期动态及质量性状

按照《黄麻种质资源描述规范和数据标准》^[11]调查各种质生育期动态和质量性状,结果列于表 2。由表 2 可知,参试的 23 个种质在出叶速度方面无差异,但在现蕾、初花和结果的时间上差异较大。所有种质从播种到结果介于 79~127 d,其中早熟种质(含特早熟 J018)12 个、中熟种质 7 个、晚熟种质 4 个, J001 和 J007 历时最长,其次是 J008 和 J022, J018 最短。

各种质在叶形和茎色方面同样具有较大差异。叶形可分为椭圆、卵圆、披针 3 种类型,分别占 65.22%、17.39%、17.39%;茎色按照《黄麻种质资源描述规范和数据标准》^[11]中的描述属于中期茎色,有绿、红、鲜红、褐 4 种类型,以绿茎种质为主,共

有 15 个,红茎种质 4 个,鲜红和褐色茎种质各 2 个。

从种质的来源、类型以及生育期、叶形和茎色可

以看出,参试的 23 个种质具有较大表型差异,有利于开展其相关功能基因的差异性研究。

表 2 各种质生育期动态及质量性状

Table 2 The growth dynamic and quality characters of test germplasms

(月/日)

种质代码 Number	播种期 Sowing date	子叶期 Cotyledon date	真叶期 True leaf date	现蕾期 Budding date	初花期 Blossom date	结果期 Fruiting date	叶形 Leaf shape	茎色 Stem colour
J001	05/13	05/19	05/24	08/20	09/03	09/17	椭圆	绿
J002	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	椭圆	红
J003	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	椭圆	绿
J004	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	椭圆	绿
J005	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	披针	鲜红
J006	05/13	05/19	05/24	07/23	08/06	08/20	椭圆	绿
J007	05/13	05/19	05/24	08/20	09/03	09/17	椭圆	绿
J008	05/13	05/19	05/24	08/13	08/27	09/10	椭圆	绿
J009	05/13	05/19	05/24	07/23	08/06	08/20	披针	绿
J010	05/13	05/19	05/24	07/23	08/06	08/20	卵圆	绿
J011	05/13	05/19	05/24	07/14	07/30	08/13	披针	绿
J012	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	卵圆	红
J013	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	椭圆	红
J014	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	披针	绿
J015	05/13	05/19	05/24	07/23	08/06	08/20	椭圆	绿
J016	05/13	05/19	05/24	07/23	08/06	08/20	椭圆	鲜红
J017	05/13	05/19	05/24	07/23	08/06	08/20	椭圆	绿
J018	05/13	05/19	05/24	07/07	07/14	07/30	椭圆	褐
J019	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	椭圆	红
J020	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	卵圆	绿
J021	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	椭圆	褐
J022	05/13	05/19	05/24	08/13	08/27	09/10	卵圆	绿
J023	05/13	05/19	05/24	07/07	07/23	08/06	椭圆	绿

2.2 首次采收时种质间株高差异

首次采收时株高、一二级分枝数和 3 次收获的嫩梢产量结果列于表 3。由表 3 可知,参试的 23 个种质的株高呈极显著性差异 ($P < 0.01$),所有种质高度介于 54.90 ~ 150.90 cm 之间,其中,J004 最高,其次是 J006、J007、J008、J005、J003,但该 6 个种质差异不显著;株高最低的是 J011,明显低于其他 22 个种质 ($P < 0.01$)。说明不同黄麻种质的生长速度存在较大差异,首次采收时株高低表示生长速度缓慢,反之则表示生长速度快。

2.3 种质间分枝习性差异

种质间的一、二级分枝数均呈极显著性差异 ($P < 0.01$)。由表 3 可知,二级分枝的数目明显高于一级分枝,一、二级分枝数分别介于 3.90 ~ 11.90 个和 7.10 ~ 19.70 个,这说明长果黄麻顶端优势明显,掐顶去梢可有效地促进黄麻分枝,增加叶片及嫩梢产量。

23 个种质中,一级分枝数最多的是 J005,与其他 22 个种质差异极显著 ($P < 0.01$),其次 J017、J016、J023 等 21 个种质差异不显著,分枝数最少的是 J007。二级分枝数最多的同样是 J005,与其他 22 个种质差异极显著 ($P < 0.01$),其次 J022、J018、J016、J014、J021、J023、J015 和 J004 等 8 个种质无显著差异,但极显著高于 J012、J011、J002、J019、J003、J001、J020、J009 和 J007 ($P < 0.01$);分枝数较少的 5 个种质是 J007、J009、J020、J001、J003。

2.4 种质间主茎及一、二级分枝嫩梢产量差异

从表 3 可知,主茎、一级分枝、二级分枝嫩梢产量逐次升高,分别介于 61.40 ~ 252.10 g、224.00 ~ 584.10 g、220.80 ~ 715.10 g,主茎与一、二级分枝嫩梢产量呈极显著性差异 ($P < 0.01$),而一、二级分枝间嫩梢产量无显著性差异,说明分枝数量对嫩梢产量具有重大影响,但这种影响随着分枝级数的增加会逐渐减小。

表 3 不同黄麻种质相关功能性状指标

Table 3 Functional characters of different jute germplasms

种质代码 Number	株高 (cm) Plant height	分枝数(个) Branching number		嫩梢产量(g) New shoot yield		
		一级 Primary	二级 Secondary	主茎 Main stem	一级分枝 Primary branch	二级分枝 Secondary branch
J001	130.40 ± 13.63 ^{bcd}	5.10 ± 1.10 ^{cdefg}	9.30 ± 2.83 ^{hij}	197.70 ± 5.65 ^{bc}	404.00 ± 12.17 ^{cd}	416.40 ± 10.86 ^{gh}
J002	131.70 ± 14.12 ^{bcd}	4.60 ± 1.35 ^{efg}	11.10 ± 3.93 ^{fgh}	231.60 ± 20.37 ^{ab}	321.30 ± 18.98 ^{ef}	428.80 ± 18.41 ^{fg}
J003	141.60 ± 13.00 ^{abc}	4.20 ± 1.32 ^{fg}	9.40 ± 2.07 ^{hij}	196.50 ± 14.60 ^{bc}	324.80 ± 21.71 ^{ef}	439.30 ± 18.28 ^{fg}
J004	150.90 ± 15.09 ^a	5.70 ± 2.75 ^{bcd}	13.80 ± 3.12 ^{bcd}	128.40 ± 8.36 ^{defg}	224.00 ± 12.29 ^h	387.00 ± 12.29 ⁱ
J005	142.50 ± 7.23 ^{abc}	11.90 ± 5.51 ^a	19.70 ± 7.47 ^a	252.10 ± 27.61 ^a	573.40 ± 16.15 ^a	715.10 ± 10.85 ^a
J006	147.30 ± 22.22 ^{ab}	6.30 ± 2.26 ^{bcd}	13.40 ± 5.85 ^{cdef}	174.50 ± 15.22 ^{cd}	376.90 ± 13.94 ^{de}	565.60 ± 17.91 ^c
J007	146.20 ± 12.30 ^{ab}	3.90 ± 0.99 ^g	7.10 ± 2.38 ^j	195.10 ± 26.23 ^{bc}	584.10 ± 17.25 ^a	611.30 ± 9.79 ^b
J008	144.30 ± 7.21 ^{abc}	5.00 ± 2.36 ^{defg}	13.50 ± 4.17 ^{bcd}	195.70 ± 22.28 ^{bc}	398.80 ± 11.97 ^d	508.00 ± 8.54 ^d
J009	126.70 ± 12.10 ^{cdef}	5.00 ± 1.49 ^{defg}	8.30 ± 1.25 ^{ij}	132.40 ± 27.48 ^{defg}	243.70 ± 6.02 ^{sh}	249.40 ± 6.12 ^k
J010	115.20 ± 10.83 ^{defg}	5.40 ± 2.67 ^{cdef}	11.90 ± 4.18 ^{efg}	108.30 ± 11.39 ^{fgh}	331.10 ± 20.85 ^{ef}	326.00 ± 12.53 ^j
J011	54.90 ± 5.97 ⁱ	5.90 ± 1.29 ^{bcd}	11.20 ± 3.52 ^{fgh}	121.30 ± 7.45 ^{defg}	462.10 ± 12.15 ^{bc}	428.60 ± 2.25 ^{fg}
J012	119.20 ± 13.08 ^{def}	6.00 ± 1.76 ^{bcd}	11.20 ± 4.54 ^{fgh}	111.50 ± 12.13 ^{efgh}	420.90 ± 14.37 ^{cd}	446.30 ± 7.20 ^f
J013	129.50 ± 10.48 ^{bcd}	5.10 ± 1.52 ^{cdefg}	13.10 ± 4.09 ^{def}	167.90 ± 12.54 ^{cde}	419.50 ± 7.05 ^{cd}	472.60 ± 6.47 ^e
J014	119.60 ± 15.66 ^{def}	4.80 ± 2.10 ^{efg}	15.20 ± 4.92 ^{bcd}	146.30 ± 8.97 ^{cdef}	409.10 ± 8.05 ^{cd}	435.00 ± 7.00 ^{fg}
J015	97.50 ± 21.14 ^{gh}	5.90 ± 1.66 ^{bcd}	14.20 ± 2.97 ^{bcd}	172.60 ± 17.36 ^{cd}	404.60 ± 13.69 ^{cd}	398.80 ± 3.94 ^{hi}
J016	109.10 ± 17.12 ^{fg}	6.50 ± 1.27 ^{bc}	15.80 ± 8.27 ^{bc}	142.60 ± 28.56 ^{cdef}	490.20 ± 11.30 ^b	418.30 ± 6.02 ^{sh}
J017	88.90 ± 20.93 ^h	6.90 ± 1.85 ^b	13.40 ± 3.10 ^{cdef}	61.40 ± 7.50 ^h	273.20 ± 3.65 ^{fgh}	265.20 ± 10.18 ^k
J018	114.70 ± 13.18 ^{defg}	5.40 ± 2.88 ^{cdef}	16.00 ± 4.06 ^b	117.60 ± 11.89 ^{defg}	282.00 ± 13.00 ^{fgh}	336.20 ± 16.10 ^j
J019	98.10 ± 10.33 ^{gh}	4.80 ± 1.55 ^{efg}	10.30 ± 2.31 ^{ghi}	173.00 ± 10.00 ^{cd}	494.00 ± 13.89 ^b	415.80 ± 8.01 ^{sh}
J020	89.40 ± 8.26 ^h	4.60 ± 1.84 ^{efg}	8.80 ± 2.62 ^{hij}	113.80 ± 11.64 ^{efgh}	295.80 ± 5.94 ^{fg}	325.70 ± 5.98 ^j
J021	122.90 ± 15.04 ^{def}	6.30 ± 1.34 ^{bcd}	14.80 ± 1.99 ^{bcd}	159.40 ± 7.61 ^{cdef}	423.80 ± 5.41 ^{cd}	416.00 ± 8.19 ^{sh}
J022	110.60 ± 12.22 ^{efg}	4.90 ± 1.97 ^{defg}	16.20 ± 2.57 ^b	152.70 ± 28.86 ^{cdef}	461.90 ± 10.97 ^{bc}	453.10 ± 16.87 ^{ef}
J023	129.50 ± 20.42 ^{bcd}	6.30 ± 1.83 ^{bcd}	14.30 ± 3.59 ^{bcd}	79.40 ± 15.62 ^{gh}	271.00 ± 9.54 ^{fgh}	220.80 ± 4.53 ^l
平均 Mean	120.03 ± 23.17	5.67 ± 1.56	12.70 ± 3.03	153.56 ± 46.46	386.53 ± 99.08	420.84 ± 112.21

不同小写字母间差异极显著 ($P < 0.01$), 下同

Different small letters indicate very significant difference ($P < 0.01$), the same as below

23 个参试种质在主茎及一、二级嫩梢产量方面差异均达极显著水平 ($P < 0.01$)。主茎嫩梢中, J005 和 J002 的产量排在前 2 位, 二者间差异不显著, 其次为 J001、J003、J008、J007、J006 等 16 个种质, 排在最后 5 位的是 J017、J023、J010、J012、J020, 且这 5 个种质差异不显著。一级分枝嫩梢中, J007 和 J005 的产量最高, 二者无显著性差异, 但与其他 21 个种质差异极显著 ($P < 0.01$), 其次为 J019、J016、J011、J022, 四者间无显著性差异, 但极显著高于 J008、J006、J010、J003、J002、J020 等 11 个种质 ($P < 0.01$)。二级分枝嫩梢中, J005 产量最高, 其次为 J007、J006、J008, 这 4 个种质呈极显著性差异 ($P < 0.01$), 最低的是 J023, 与其他 22 个种质差异极显著 ($P < 0.01$)。结合 3 批嫩梢产量看, J005 表现最好, 其次为 J007、J006、J008。3 批收获的嫩梢

产量 J005 均居前列, 显示其增产潜力明显。

2.5 种质间对废水中 Cr(VI) 去除率差异

各种质每重复分 3 批次收获的黄麻嫩梢分别用来吸附溶液中的 Cr(VI), 平均去除率结果列于表 4。从各种质各批次嫩梢平均去除率检测与统计结果来看, 23 个种质对 Cr(VI) 均有较强的吸附能力, 但存在极显著差异 ($P < 0.01$), 平均去除率最高的是 J011(96.88%), 高于 90% 的有 10 个, 最低的 3 个种质是 J003、J021、J013, 平均去除率在 85% 左右。

从各级嫩梢去除率差异来看, 主茎及一、二级分枝的嫩梢对 Cr(VI) 的去除率分别为 $88.23\% \pm 2.38\%$ 、 $88.56\% \pm 2.61\%$ 、 $93.11\% \pm 2.68\%$ 。Duncan 多重比较结果显示, 二级分枝嫩梢对 Cr(VI) 的去除率明显高于主茎与一级分枝嫩梢, 达极显著水平 ($P < 0.01$), 主茎与一级分枝嫩梢间差异不显著。

造成不同批次间差异的原因可能是收割时间间隔不同,这在其他植物上也存在同样的现象^[12]。另外,天气变化也对植株的物质形成及养分积累产生影响,

在烤烟上彭新辉等^[13]做过气候对叶片成分影响的研究,认为光照、温度、水分均对烤烟叶片成分有较大影响。

表 4 不同黄麻种质嫩梢对 Cr(VI) 的去除率

Table 4 The removal rate of different jute germplasms on Cr(VI)

嫩梢的去除率(%) Removal rate of tender shoot					嫩梢的去除率(%) Removal rate of tender shoot				
种质代码 Number	主茎 Main stem	一级分枝 Primary branch	二级分枝 Secondary branch	平均 Mean	种质代码 Number	主茎 Main stem	一级分枝 Primary branch	二级分枝 Secondary branch	平均 Mean
J001	89.23 ± 0.86 ^{bc}	90.85 ± 0.43 ^{bed}	93.12 ± 2.11 ^{edef}	91.06 ± 1.95 ^{abc}	J013	86.63 ± 1.72 ^{ede}	85.82 ± 1.01 ^{ij}	91.01 ± 2.53 ^{defg}	87.82 ± 2.79 ^{bc}
J002	89.88 ± 3.51 ^{bc}	92.14 ± 0.99 ^{bc}	94.82 ± 0.57 ^{bed}	92.28 ± 2.48 ^{abc}	J014	89.06 ± 0.71 ^{bc}	88.58 ± 0.49 ^{defghi}	92.58 ± 1.62 ^{def}	90.07 ± 2.18 ^{abc}
J003	83.39 ± 2.34 ^e	84.69 ± 2.40 ^j	87.66 ± 2.32 ^f	85.25 ± 2.19 ^c	J015	86.79 ± 0.58 ^{ede}	86.47 ± 1.41 ^{ghij}	94.36 ± 1.95 ^{bcde}	89.21 ± 4.46 ^{bc}
J004	86.96 ± 1.29 ^{cd}	86.63 ± 1.49 ^{fghij}	91.23 ± 1.31 ^{def}	88.27 ± 2.56 ^{bc}	J016	90.20 ± 1.41 ^{bc}	89.39 ± 0.49 ^{efg}	96.31 ± 1.24 ^{abc}	91.96 ± 3.78 ^{abc}
J005	87.93 ± 0.65 ^{cd}	89.06 ± 0.86 ^{defgh}	92.31 ± 1.22 ^{def}	89.77 ± 2.27 ^{abc}	J017	88.58 ± 1.44 ^c	89.55 ± 2.02 ^{cd}	93.60 ± 1.39 ^{bcde}	90.58 ± 2.67 ^{abc}
J006	87.12 ± 1.56 ^{cd}	86.63 ± 1.56 ^{fghij}	90.93 ± 0.24 ^{efg}	88.23 ± 2.35 ^{bc}	J018	92.14 ± 0.56 ^{ab}	88.25 ± 1.69 ^{defghi}	96.95 ± 2.61 ^{ab}	92.45 ± 4.36 ^{abc}
J007	87.77 ± 1.69 ^{cd}	86.15 ± 0.71 ^{hij}	91.33 ± 0.16 ^{def}	88.42 ± 2.65 ^{bc}	J019	87.44 ± 0.74 ^{cd}	89.39 ± 0.43 ^{efg}	94.47 ± 0.75 ^{bcde}	90.43 ± 3.63 ^{abc}
J008	86.96 ± 1.29 ^{cd}	86.96 ± 0.56 ^{efghij}	92.06 ± 1.05 ^{def}	88.66 ± 2.95 ^{bc}	J020	89.55 ± 0.28 ^{bc}	89.88 ± 0.65 ^{ede}	94.52 ± 2.31 ^{bcde}	91.32 ± 2.78 ^{abc}
J009	87.61 ± 0.58 ^{cd}	87.93 ± 0.90 ^{defghi}	92.20 ± 0.50 ^{def}	89.24 ± 2.56 ^{bc}	J021	84.85 ± 0.90 ^{de}	86.31 ± 0.84 ^{hij}	89.55 ± 0.43 ^{fg}	86.90 ± 2.41 ^{bc}
J010	90.04 ± 0.99 ^{bc}	92.79 ± 0.99 ^b	96.95 ± 1.35 ^{ab}	93.26 ± 3.48 ^{ab}	J022	88.42 ± 1.72 ^{cd}	89.88 ± 1.27 ^{ede}	92.69 ± 1.70 ^{def}	90.33 ± 2.17 ^{abc}
J011	95.06 ± 1.33 ^a	95.87 ± 1.60 ^a	99.71 ± 0.25 ^a	96.88 ± 2.48 ^a	J023	86.47 ± 1.55 ^{ede}	86.47 ± 0.71 ^{ghij}	91.44 ± 0.61 ^{def}	88.13 ± 2.87 ^{bc}
J012	87.28 ± 0.99 ^{cd}	87.28 ± 0.49 ^{efghij}	91.71 ± 0.73 ^{def}	88.76 ± 2.56 ^{bc}	平均 mean	88.23 ± 2.38	88.56 ± 2.61	93.11 ± 2.68	89.97 ± 2.72

2.6 主要调查性状间相关性分析

对首次采收时的株高、一级分枝数、二级分枝数,主茎和一、二级分枝嫩梢产量以及平均去除率进行相关性分析,结果如表 5 所示,株高与主茎嫩梢产量呈显著正相关($P < 0.05$),与平均去除率成极显著负相关($P < 0.01$);一级分枝数与二级分枝数呈极显著正相关($P < 0.01$);3 批产量之间互呈极显著正相关($P < 0.01$)。

2.6.1 株高、分枝数与产量的关系 首次采收时的株高与主茎嫩梢产量呈显著正相关($P < 0.05$),而与一、二级分枝嫩梢产量无显著性差异。这说明在分枝前,株高对嫩梢产量影响较大,分枝后无显著影响,种质的分枝习性由种质自身决定,而不是由株高

决定。一级分枝数与一级分枝嫩梢产量,二级分枝数与二级分枝嫩梢产量呈正相关但不显著,说明分枝后的嫩梢产量高低不完全取决于分枝数,而是由多种因素如植株的节间长度、叶片的大小与厚度、采收时间共同影响的。如 J011 株高最低,但其总分枝数与总嫩梢产量分别居于第 16 位和第 11 位。

2.6.2 种质间株高与去除率的关系 本研究结果显示,株高与去除率呈极显著负相关($P < 0.01$),株高越高,去除率越低。如 J011 的株高最低,而去除率却是最高。这可能是由于基因型不同,导致各种质生长速度不同,首次采收时株高越高,生长速度越快,嫩梢部位积累的具有吸附作用的物质就越少。

表 5 各指标的相关性分析

Table 5 Correlation analysis among various indicators

项目 Items	株高 Plant height	一级分枝数 No. of primary branching	二级分枝数 No. of secondary branching	主茎嫩梢产量 Tender shoot yield of main stem	一级分枝嫩梢产量 Tender shoot yield of primary branch	二级分枝嫩梢产量 Tender shoot yield of secondary branch	平均去除率 Average removal rate
株高	1.000						
一级分枝数	0.047	1.000					
二级分枝数	0.043	0.639 **	1.000				
主茎嫩梢产量	0.491 *	0.144	0.000	1.000			
一级分枝嫩梢产量	-0.031	0.271	0.132	0.532 **	1.000		
二级分枝嫩梢产量	0.401	0.357	0.186	0.771 **	0.771 **	1.000	
平均去除率	-0.684 **	0.040	0.013	-0.222	0.065	-0.173	1.000

** 和 * 分别表示在 0.01 和 0.05 水平上显著相关

** and * indicate significant difference at the level of 0.01 and 0.05, respectively

3 结论与讨论

本研究中 23 个黄麻种质,在生育期、株高、分枝习性嫩梢产量以及对 Cr(VI) 的去除率上表现出明显差异,遗传多样性丰富,这使得育种者有可能采用杂交育种等手段来改良现有种质,以获得去除率和嫩梢产量均较高的黄麻吸附重金属专用品种。

黄麻嫩梢对 Cr(VI) 的吸附属于生物吸附^[14],吸附材料中的有效成分多少是影响吸附效果的关键因素。种质间基因型的差异从根本上影响了黄麻的生育期、生长速度、嫩梢部位积累的物质含量以及嫩梢产量等性状,进而影响了对 Cr(VI) 离子的吸附效果^[15-21]。同一株黄麻,不同分枝级数间的产量和吸附效果存在较大差异,分枝级数越高,分枝数和嫩梢产量越高,制成的吸附剂对溶液中 Cr(VI) 的去除率也越高。首次采收时的株高与去除率、产量均有较强的相关性,但与产量呈正相关,与去除率呈负相关。如何协调好嫩梢产量与去除率的关系值得进一步研究。

在黄麻吸附重金属专用种质筛选中,确定主要功能目标性状是一项重要任务,既要重点考虑种质的吸附能力,同时要兼顾种质各项功能性状的协调。较强的分枝性与适宜的生长速度、叶片大而肥厚,较高的去除率可以作为选育黄麻吸附重金属专用种质的重要参考指标。本研究依据各种质的嫩梢产量和对 Cr(VI) 的去除率两方面综合评定,认为 J001 和 J011 表现较好,可作为吸附重金属专用种质在生产上使用。

参考文献

[1] 龚友才,黎宇,粟建光,等. 恢复黄麻生产开发黄麻新产品[J]. 中国麻业,2003,25(6):300-303

- [2] 陈基权,龚友才,戴志刚,等. 圆果黄麻新品种 C2005-43 的选育[J]. 中国麻业科学,2013,35(10):234-238
- [3] Munagapati V S, Yarramuthi V, Nadavala S K, et al. Biosorption of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) by *Acacia leucocephala* bark powder: Kinetics, equilibrium and thermodynamics [J]. Chem Eng J, 2010, 157: 357-365
- [4] 于明革,陈英旭. 茶废弃物对溶液中重金属的生物吸附研究进展[J]. 应用生态学报,2010,21(2):505-513
- [5] 范春晖,张颖,张颖超,等. 红外光谱法研究低温焚烧稻壳灰对 Cr(VI) 的吸附机理[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(9):2345-2349
- [6] 马静. 天然植物材料作为吸附剂处理低浓度重金属废水的研究[D]. 长沙:湖南大学,2007
- [7] 王焰新. 去除废水中重金属的低成本吸附剂:生物质和地质材料的环境利用[J]. 地学前缘,2001,8(2):301-307
- [8] 李灵香玉,吴坚阳,田光明,等. 利用农业废弃物处理重金属离子废水的研究进展[J]. 农机化研究,2009,31(9):209-214
- [9] 朱媛媛,蒋新元,胡迅. 生物质材料在重金属废水处理中的应用[J]. 环境保护科学,2008,34(1):9-12
- [10] 尚邦懿. GB 7467-87 水质六价铬的测定二苯碳酰二肼分光光度法[M]. 北京:中国环境科学出版社,1987
- [11] 粟建光,龚友才,戴志刚,等. 黄麻种质资源描述规范和数据标准[M], 1版. 北京:中国农业出版社,2005:10-23
- [12] 王国法,韩常灿,林宇清,等. 甘薯茎叶刈割率与刈割间隔时间[J]. 山地农业生物学报,2000,19(4):239-242
- [13] 彭新辉,易建华,周清明. 气候对烤烟内在质量的影响研究进展[J]. 中国烟草科学,2009,3(1):68-72
- [14] Michalak I, Chojnacka K, Witek-Krowiak A. State of the art for the biosorption process—a review [J]. Appl Biochem Biotechnol, 2013, 170: 1389-1416
- [15] 曾日秋,洪建基,李跃森,等. 菜用黄麻资源筛选及品质评价[J]. 中国麻业科学,2010,32(4):189-192
- [16] 王成章,齐胜利,史莹华,等. 不同苜蓿品种比较试验[J]. 华中农业大学学报,2002,21(1):44-46
- [17] 李强,王伟,王亚辉. 津巴布韦烤烟品种比较试验[J]. 中国农学通报,2008,24(2):177-179
- [18] 刘兵,邹记,段琼艳. 紫云英品种比较试验研究初报[J]. 耕作与栽培,2013(1):43-46
- [19] 薛月寒,吴文婧,叶剑秋,等. 木薯种质的遗传多样性评价及高产种质初级筛选[J]. 植物遗传资源学报,2014,15(1):74-83
- [20] 张向前,刘景辉,齐冰洁,等. 燕麦种质资源主要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2010,11(2):168-174
- [21] 郁香荷,章秋平,刘威生,等. 中国李种质资源形态性状和农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2011,12(3):402-407